

УДК 539.422.5

**А.В. Белый<sup>1</sup>, В.Н. Гаранин<sup>2</sup>, А.А. Гришкевич<sup>2</sup>, А.Ф. Аникеенко<sup>2</sup>**  
 (A.V. Belyj<sup>1</sup>, V.N. Garanin<sup>2</sup>, A.A. Grishkevich<sup>2</sup>, A.F. Anikeenko<sup>2</sup>)  
 (<sup>1</sup>Физико-технический институт НАН Беларуси, <sup>2</sup>БГТУ, г. Минск, РБ)  
 E-mail для связи с авторами: garanin@wmt.by, dosy@belstu.by

## **ОСОБЕННОСТИ НАНЕСЕНИЯ УПРОЧНЯЮЩИХ ПОКРЫТИЙ ПРИ ИССЛЕДОВАНИИ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ ФРЕЗЕРНОГО ДЕРЕВОРЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА**

## **FEATURES OF THE APPLICATION HARD COATINGS DURING THE STUDY OF WEAR RESISTANCE WOODWORKING MILLS**

*Популярный сегодня метод контроля износостойкости инструмента не всегда объективен, поскольку при большом количестве обрабатываемого материала инструмент с различными упрочняющими слоями находится в различных условиях эксплуатации (из-за низкой стабильности физико-механических свойств древесины, а также из-за влияния случайных факторов технологии обработки). Для исключения представленных недостатков в работе предлагается метод, основанный на том, что упрочняющие слои формируются на части длины режущего ножа. При этом обеспечиваются равные условия эксплуатации упрочненной и не упрочненной областей режущего инструмента, позволяющие лучше оценить свойства упрочняющих технологий.*

*Popular today method of monitoring the wear resistance of tool not always objective, because when a large amount of workpiece material tool with various reinforcing layers is located in different operating conditions (due to low stability of physico-mechanical properties of wood, and also due to the influence of random factors processing technology). For elimination are presented discussed shortcomings, this paper proposes a method based on that the strengthen ing layers are formed on part of the length of the cutting knife. It provides equal operating conditions of the hardened and not hardened areas of the cutting tool that will better measure the properties of hardening technologies.*

Развитие упрочняющих технологий способствует развитию не только деревообрабатывающего инструмента в целом, но также и методик его испытаний, позволяющих объективно оценивать новые технологии с целью выявления наиболее эффективных для использования. Стандартные подходы в современных условиях быстрого изменения не всегда оправданы из-за необходимости затрат значительных ресурсов (материальных и временных) на проведения испытаний. По этой причине в настоящее время актуален вопрос развития методик сравнительных испытаний, позволяющих сократить издержки при сохранении адекватности получаемых результатов. Этот вопрос актуален и в деревообработке при внедрении упрочняющих технологий на деревообрабатывающих предприятиях Республики Беларусь.

Исследования твердости и коррозионной стойкости позволяют уменьшить количество неконтролируемых факторов, влияющих на процесс износа. В настоящее время наибольшую популярность получил метод контроля износостойкости инструмента, основанный на прямом измерении количества обработанного материала. При этом

критерием оценки является качество обработки, т. е. при возникновении дефектов обрабатываемого материала инструмент признается изношенным. В то же время такая методика оценки не всегда является достаточно объективной, поскольку при большом количестве обрабатываемого материала инструмент с различными упрочняющими слоями находится в различных условиях эксплуатации из-за низкой стабильности физико-механических свойств древесины, а также из-за влияния случайных факторов технологии обработки.

Срок службы режущего инструмента определяется в основном износостойкостью его режущей части. Режущую часть обычно выполняют из сплавов на основе железа, в частности, из инструментальных быстрорежущих сталей, легированных вольфрамом и молибденом, которые содержат до 2 % ванадия (P18, P12, P9, P6M5, P6M3 и др.), а также из сталей, легированных вольфрамом и кобальтом, где свыше 2 % ванадия (P18Ф2, P14Ф5, P9Ф5, P10Ф5K5, P9K5, P9K10 и др.) [1, 2]. Первую группу относят к сталям нормальной производительности, а вторую – к сталям повышенной производительности. Высокие эксплуатационные свойства быстрорежущих сталей обеспечиваются благодаря их легированию вольфрамом, ванадием и молибденом, которые, соединяясь с углеродом, образуют соответствующие карбиды. Износостойкость быстрорежущих сталей в 3–5 раз выше чем у углеродистых и низколегированных сталей. Недостатком инструмента, выполненного из этих сталей, является относительно низкая устойчивость к абразивному износу. Это связано, с одной стороны, с малым различием в твердости между материалом инструмента и обрабатываемым материалом, а с другой – с попаданием инородных частиц, например, песка, в зону взаимодействия резца и материала в процессе резания. Высокая твердость частиц загрязнений приводит к быстрому абразивному износу режущей части инструмента. Сравнительная оценка износостойкости рассматриваемого режущего инструмента проводится обычно на основании многофакторных экспериментов с планами второго порядка [3, 4]. Это всегда связано с проведением большого количества экспериментов, что далеко не всегда является возможным.

Наиболее эффективным методом борьбы с абразивным износом инструмента является нанесение упрочняющих покрытий, характеризующихся высокой твердостью [5]. Для этих целей используют покрытия на основе соединений тугоплавких металлов, формируемых различными методами. Толщина покрытия определяется видом и назначением инструмента и может составлять от долей микрон до величин порядка мм. Оценка их износостойкости проводят, как правило, на основании измерения твердости и коррозионной стойкости. Однако такая оценка зачастую не дает реальной картины износостойкости инструмента, поскольку фактический износ зависит не только от этих параметров. Важнейшим параметром износостойкости покрытий является их адгезия к основанию, которая для упомянутых покрытий является невысокой. Шелушение покрытия в процессе эксплуатации инструмента не позволяет в полной мере оценить его свойства.

В настоящее время для проведения сравнительных испытаний используется режущий инструмент, содержащий режущую часть как из стали, так и из твердосплавного материала с нанесенным на нее упрочняющим покрытием, которое может состоять из комбинированного подслоя титана (нитрида, оксинитрида, карбоксинитрида; из слоя нитрида, карбида, оксида, карбонитрида, оксикарбида, оксинитрида, тугоплавкого металла карбоксинитрида) [6].

По сути, первый слой на основе титана служит для обеспечения требуемой адгезии второго слоя, который является упрочняющим, поскольку перечисленные соединения характеризуются невысокой адгезией к металлическим основаниям и отшелушиваются в процессе эксплуатации инструмента. Пленки на основе титана обладают

превосходной адгезией к металлам и их сплавам, но характеризуются сравнительно низкой износостойкостью. Поэтому принципы, положенные в основу использования конструкций режущего инструмента (адгезионный слой на основе титана плюс упрочняющий слой), являются типовыми в технике упрочнения. В качестве основания при этом могут быть использованы не только твердосплавные материалы, но и различные сорта стали.

Оценка износостойкости таких покрытий на основании измерения твердости и коррозионной стойкости является уже более адекватной, поскольку уменьшается количество неконтролируемых факторов, влияющих на процесс износа. Однако наибольшую популярность получил метод контроля износостойкости инструмента, основанный на прямом измерении количества обработанного материала. При этом критерием оценки является качество обработки: при возникновении дефектов обрабатываемого материала, например, сколов кромки, инструмент признается изношенным. В то же время такая методика оценки не всегда является достаточно объективной, поскольку при большом количестве обрабатываемого материала инструмент с различными упрочняющими слоями находятся в различных условиях эксплуатации: меняется твердость обрабатываемого материала, его состав, количество загрязнений, усилие подачи и т. п. В таких случаях правильный выбор упрочняющего покрытия инструмента для обработки того или иного материала становится крайне затруднительным, поскольку для инструмента с худшими свойствами существует вероятность эксплуатации в более мягких условиях, когда его износ существенно меньше по сравнению с износом инструмента с лучшими характеристиками, но подвергается более жесткой эксплуатации. Кроме того, в процессе эксплуатации инструмент подвергается значительным термоциклическим нагрузкам, зависящим от режима эксплуатации. Известно, что температура в зоне резания может достигать 1 000 °С и более [7, 8]. Это приводит к постоянной рекристаллизации структуры упрочняющего покрытия с укрупнением размера зерна и сопутствующим снижением износостойкости, которое зависит не только от материала покрытия, но и от способа его получения и ряда других факторов. Такая многофакторность зачастую делает невозможным сравнительную оценку износостойкости инструмента с различными упрочняющими слоями.

Задачу повышения достоверности оценки износостойкости упрочняющих слоев инструмента можно решить тем, что в режущем инструменте для контроля износостойкости упрочняющих покрытий, содержащем режущую часть из стали или твердосплавного материала с последовательно нанесенными на него упрочняющими слоями, упрочняющие слои формируются на части инструмента, а точнее на 30–70 % длины его режущей части.

Сущность решения заключается в обеспечении абсолютно равных условий эксплуатации упрочненной и неупрочненной областей режущей части испытуемого инструмента.

При эксплуатации режущего инструмента упрочненная и неупрочненная области режущей кромки работают в абсолютно равных условиях: скорость подачи, температура разогрева в результате трения, твердость обрабатываемого материала, его чистота (например, наличие абразивных частиц в виде песка) и все остальное. В этом случае оценить износостойкость упрочняющего покрытия можно прямым измерением изменения разницы радиусов резания упрочненной и неупрочненной областей режущей кромки в процессе эксплуатации (рис. 1). Повышенная скорость износа одной из областей инструмента сопровождается большим снижением радиуса резания. Чем больше изменение радиусов резания, тем больше износостойкость упрочняющего покрытия.

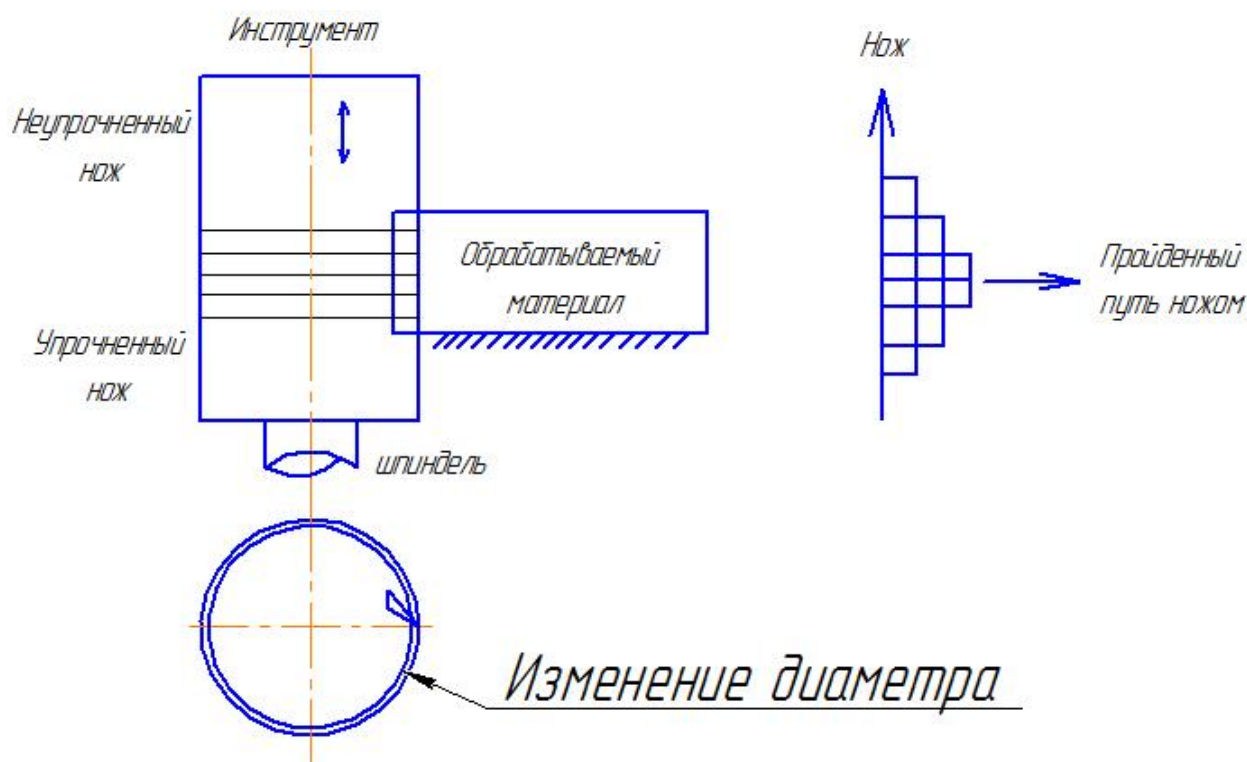


Рис. 1. Изменение радиуса резания при испытаниях

Заявляемый инструмент предназначен только для оценки износостойкости покрытий. На основании полученных данных выбирают оптимальный состав покрытия, который затем формируют на всей длине режущей кромки инструмента, используемого в производстве. В то же время все изделия, обработанные заявляемым инструментом, относятся к группе годных, поскольку изменение радиуса резания составляет величины порядка сотых долей мм. Наличие ступеньки такой высоты на поверхности обрабатываемого материала, как правило, не отражается на потребительских свойствах полученных изделий.

Заявляемое решение предусматривает возможность оценки износостойкости инструмента вне зависимости от материала покрытия. Поэтому вид фактически используемого упрочняющего покрытия в данном случае может быть любым.

Соотношение длин упрочненной и неупрочненной областей режущей кромки выбрано на основании экспериментальных данных [9]. Если длина упрочненной области составляет более 70 %, например, 80 %, то существенно сужается ассортимент обрабатываемых изделий при проведении испытаний. В этом случае надо использовать только те изделия, при обработке которых задействована практически вся длина режущей кромки. Если же задействована только часть режущей кромки (в данном случае – преимущественно упрочненная область), то другая область износу не подвергается, что приводит к появлению ошибки при контроле. И наоборот, если длина упрочненной части составляет менее 30 % всей длины режущей кромки, то существенно возрастает вероятность возникновения ошибки контроля, связанной с отсутствием воздействия на упрочненную область.

Сущность заявляемого решения поясняется на рисунке 2, где приведено схематическое изображение заявляемого режущего инструмента и схема проведения измерений износа.

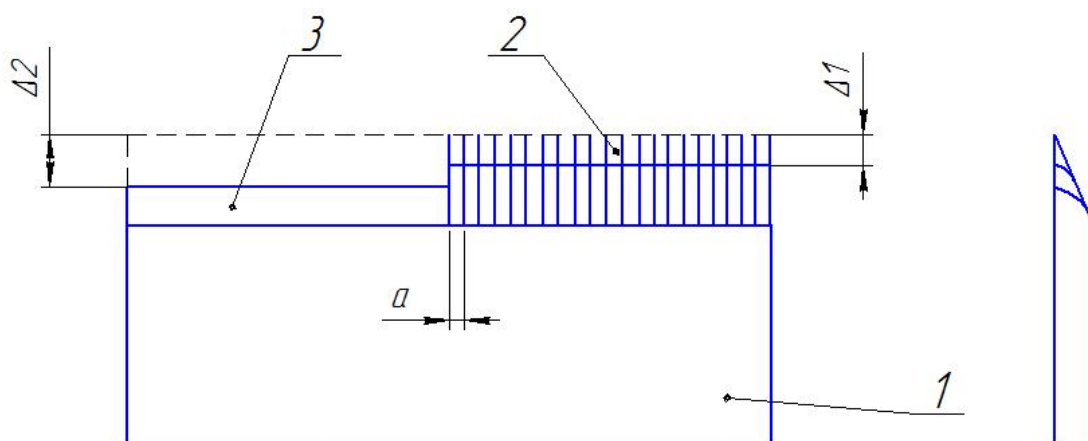


Рис. 2. Схема упрочнения инструмента:  
1 – режущая часть; 2 – упрочненная область; 3 – неупрочненная область;  
 $\Delta_1$  – износ упрочненной области;  $\Delta_2$  – износ неупрочненной области

Штриховой линией изображена режущая кромка инструмента до испытаний, а сплошными линиями – после.

Как видно из рисунка 2, заявляемый инструмент состоит из режущей части 1, которая содержит упрочненную область 2 и неупрочненную область 3. По мере эксплуатации обе области подвергаются износу, при этом износ упрочненной области  $\Delta_1$  (при положительных результатах использования упрочняющих технологий) меньше износа неупрочненной области  $\Delta_2$ .

Оценка износостойкости упрочняющих покрытий с использованием заявляемого инструмента осуществляется следующим образом. Изготавливают несколько инструментов с различными упрочняющими покрытиями. Причем каждое покрытие наносят на 30–70 % длины режущей части 1. Инструмент устанавливают во фрезерный инструмент и начинают обработку материалов, например, деревянных заготовок. Инструмент контактирует с заготовкой в процессе обработки упрочненной частью 2 и неупрочненной частью 3 одновременно. Изменение режимов обработки, твердости материала, его чистоты, динамика термоциклических нагрузок и т. п. сопровождаются одинаковыми изменениями воздействия как на упрочненную область 2, так и на неупрочненную область 3. Поэтому разница износа упрочненной области  $\Delta_1$  и износа неупрочненной области  $\Delta_2$  адекватно отражает относительную износостойкость упрочняющего покрытия, нанесенного на упрочненную область 2. Измерение этой разницы для всего спектра исследуемых покрытий позволяет однозначно определить наиболее оптимальное из них для упрочнения инструмента, используемого для обработки выбранного типа материала.

Кроме того, путем поэтапного перемещения инструмента с ножом во время проведения испытаний в осевом направлении на величину  $a$  (рис. 1 и 2) появляется возможность построить временную зависимость потери режущей способности. Параметр  $a$  зависит от количества точек  $k$  этой зависимости. Минимальное его значение, установленное экспериментально, составляет 3 мм. В противном случае возникают существенные затруднения по обеспечению измерений фактического износа. Очевидно, что максимальное значение  $a_{\max}$  должно удовлетворять соотношению (1).

$$a_{\max} < b/k, \quad (1)$$

где  $b$  – ширина обрабатываемого материала, мм.

Максимальное значение  $b$  в этом случае определяется фактической длиной упрочненной части  $l_{\text{упр}}$  из соотношения  $b < l_{\text{упр}}$ , а возможное количество контрольных точек  $k = l_{\text{упр}}/3$ .

При поэтапном перемещении инструмента в процессе испытаний каждый его участок длиной  $a$  проходит фиксированный путь в материале, что определяется фактическим номером измеряемой точки  $k$  (от периферии до центра путь будет расти). Это позволяет получить значение величины износа в зависимости от количества обработанного материала, т. е. динамику потери режущей способности на одном ноже за один цикл экспериментов без процедуры его снятия и установки [9].

Испытание заявляемого инструмента проводили следующим образом. Пленки осаждали на установке УРМЗ.279.048 [9], модифицированной встроенной системой сепарации плазмы при двухкатодном распылении на твердосплавные пластины с углом заострения 65 град. Неупрочняемую часть режущего инструмента маскировали фольгой. Соотношение длин упрочненной и неупрочненной областей приведено в таблице.

Соотношение длин упрочненной и неупрочненной областей инструмента

Доля упрочненной области, %	Тип соединений титана	Изменение радиуса резания упрочненной части, мкм	Изменение радиуса резания неупрочненной части, мкм	Повышение износостойкости, %	Примечание
20	Нитрид	–	–	–	Затруднение при выборе участков для измерения радиуса
30	Нитрид	40	80	100	резания
50	Нитрид	40	80	100	–
70	Нитрид	40	80	100	–
80	Нитрид	–	–	–	Затруднение при выборе участков для измерения радиуса
50	Карбид	20	80	300	резания
50	Карбонитрид	30	80	167	–
50	Оксинитрид	40	80	100	–

Ионную очистку осуществляли при потенциале смещения 1,5 кВ ионами титанового катода, после этого осаждали адгезионную пленку на основе титана толщиной  $1,5 \pm 0,1$  мкм. Затем осаждали пленки соединений титана толщиной  $2,5 \pm 0,1$  мкм при парциальном давлении азота  $0,5 \cdot 10^{-2}$  Па. Тип соединений титана приведен в таблице. Суммарная толщина всех пленок, определенная на микроинтерферометре МИИ-4, во всех случаях составляла  $4,0 \pm 0,1$  мкм.

Оценку износостойкости режущих пластин оценивали по изменению радиусов резания упрочненной и неупрочненной областей для различных типов упрочняющих покрытий при обработке плит МДФ на промышленном станке Unimat 23EL. Частота вращения составила  $6\,000\text{ мин}^{-1}$ , скорость подачи – 6 м/мин. Изменение радиусов резания определяли на установке OptiControl [9] после обработки партии плит из 48 шт.

### *Выводы*

При эксплуатации заявляемого метода испытаний, упрочненная и неупрочненная области режущей кромки работают в абсолютно равных условиях: усилие (скорость) подачи, температура разогрева в результате трения, твердость обрабатываемого материала, его чистота (например, наличие абразивных частиц в виде песка) и все остальные. В этом случае оценить износостойкость упрочняющего покрытия можно прямым измерением изменения разницы радиусов резания упрочненной и неупрочненной областей режущей кромки в процессе эксплуатации. Повышенная скорость износа одной из областей инструмента сопровождается большим снижением радиуса резания. Чем больше изменение радиусов резания, тем больше износостойкость упрочняющего покрытия.

В результате полученные данные сравнительных испытаний показали, что использование заявляемой технологии испытаний режущего инструмента для контроля износостойкости упрочняющих покрытий позволяет проводить сравнительную оценку износостойкости. При этом обеспечиваются одинаковые условия эксплуатации упрочненной и неупрочненной областей и значительно сокращаются издержки на проведение испытаний.

### **Библиографический список**

1. Гуляев А.П., Малинина К.А., Саверина С.М. Инструментальные стали. Справочник. М., Машиностроение, 1975, 272 с.
2. Геллер Ю.А. Инструментальные стали. 4-е изд. М., Металлургия, 1975. 584 с.
3. Новик Ф.С., Ярсов Я.Б. Оптимизация процессов технологии металлов методами планирования экспериментов. М.: Машиностроение; София: Техника, 1980. 304 с.
4. Пижурин А.А., Розенблит М.С. Исследования процессов деревообработки. М.: Лесная пром-сть, 1984. 232 с.
5. Вершина А.К., Агеев В.А. Ионно-плазменные защитно-декоративные покрытия. Гомель; ИММС НАНБ, 2001. 172 с.
6. Лезвийный инструмент: пат. 10171 РБ / А.К. Вершина, В.А. Агеев; заявитель и патентообладатель ГНУ «Физико-технический институт Национальной академии наук Беларуси»; заявл. 06.07.2005; опубл. 30.12.2007.
7. Резников А.Н. Теплофизика резания. М.: Машиностроение, 1969. 288 с.
8. Васин С.А., Верещака А.С., Кушнер А.С. Термомеханический подход к системе взаимосвязей при резании. Резание материалов. М.: Изд-во МГТУ им. Баумана, 2011. 448 с.
9. Влияние ионно-лучевого азотирования дереворежущего инструмента, изготовленного из быстрорежущей стали, на период его стойкости / А.В. Белый [и др.] // Труды БГТУ. 2016. № 2. Лесная и деревообаб. пром-сть. С. 266–269.